

Análisis de la sensibilidad de las estimaciones de la profundidad del basamento en la cuenca de Madrid (España Central)

Analysis of sensitivity of depth to basement techniques in Madrid Basin (Central Spain)

A.J. Olaiz¹, A. Muñoz-Martín^{2,3}, L. Cascone⁴, G. De Vicente^{2,3}, A. Mantilla-Pimiento¹

¹ Repsol Exploración, S.A. Paseo de la Castellana, 278-280. 28046 Madrid, España. antoniojose.olaiz@repsol.com, am.mantilla@repsol.com

² Grupo de Tectonofísica Aplicada. Facultad de Geología, Universidad Complutense. 28040 Madrid, España. amunoz@geo.ucm.es, gdv@geo.ucm.es

³ Instituto de Geociencias IGEO (CSIC-UCM), Madrid, España.

⁴ GETECH, Leeds, U.K. Lorenzo.Cascone@getech.com

Resumen: La cuenca de Madrid, con un área aproximada de 20.000 km², se extiende en la zona central de la Península Ibérica. Su evolución está condicionada por el levantamiento del Sistema Central y de los Montes de Toledo durante la orogenia Alpina. La cuenca de Madrid está conectada con las cuencas de Loranca, en su límite NE, y de La Mancha por el sur. El espesor de sedimentos, con registro continuo desde el Cretácico Superior hasta el Mioceno Superior, alcanza los 3000 m en el pozo Pradillo, aunque de la interpretación sísmica se obtiene un depocentro, de mayor profundidad, adosado al cabalgamiento del Borde Sur del Sistema Central. En este trabajo se han seguido distintas metodologías para estimar la profundidad del basamento, a partir de datos aeromagnéticos. Los distintos métodos (“Deconvolucion de Euler”, “Source Parameter Imaging”, “Analytic Signal” y “Tilt Depth”) tienen en común que asumen geometrías sencillas, pero los resultados obtenidos resultan de gran interés para la interpretación estructural del basamento. En el caso de la cuenca de Madrid, este conocimiento es muy importante dado su potencial geotérmico e hidrogeológico, así como un posible uso como almacenamiento geológico.

Palabras clave: cuenca de Madrid, estimaciones a la profundidad del basamento.

Abstract: The Madrid basin, over 20.000 km², located in Central Spain. Its evolution is conditioned by basement uplifts (Central System and Toledo Mountains) during the Alpine orogeny. The Madrid basin is connected with the Loranca basin at its NE corner and with La Mancha basin to the south. Sediment thickness accumulated from Late Cretaceous to the Late Miocene, is about 3.000 m at Pradillo well, but from seismic interpretation, a depocenter associated to Central System South Thrust is inferred. For this study four different methodologies were used (“Euler Deconvolution”, “Source Parameter Imaging”, “Analytic Signal” and “Tilt Depth”), in order to obtain depth to basement estimations from aeromagnetic data. These methods work for simplified source geometries, estimating depths as a good starting point for a structural interpretation. In Madrid Basin, this knowledge is important due to the geothermal and hydrological potential of the basin, as well as for CO₂ storage.

Key words: Madrid basin, depth to basement estimation.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El análisis de la geometría de las cuencas sedimentarias se realiza con técnicas geofísicas, siendo la mayor parte de las veces métodos sísmicos. No obstante, existen otros métodos geofísicos extensivos, y de adquisición rápida y económica, como son los campos potenciales naturales (gravimetría y magnetismo), que permiten analizar la estructura tanto en planta como en secciones. En este trabajo se aplican técnicas de inversión a datos magnéticos en una zona bien conocida (Cuenca de Madrid), donde existe numerosa información geológica y geofísica). El objetivo de este trabajo consiste en cuantificar la geometría del basamento por debajo de la Cuenca de Madrid a partir de datos aeromagnéticos, y comparar los resultados con los obtenidos con secciones sísmicas y sondeos. Finalmente se discute la sensibilidad de las

diferentes técnicas de inversión, teniendo en cuenta factores geológicos (litologías y estructuras)

MARCO GEOLÓGICO

La evolución tectónica de la placa Ibérica durante el Cenozoico ha producido un cambio drástico en la topografía, desde una configuración con poco relieve en el Cretácico Superior, hasta la situación actual, en la que se han desarrollado un conjunto de elevaciones del basamento y de cuencas sedimentarias. Estas cuencas han sido clasificadas teniendo en cuenta la geometría, la correlación con eventos tectónicos regionales, y el relleno sedimentario (De Vicente y colaboradores (2011). La cuenca del Tajo, dividida por la Sierra de Altomira en la cuenca de Madrid (al oeste) y la cuenca de Loranca (al E), representan una de estas zonas de acumulación de sedimentos entre áreas elevadas.

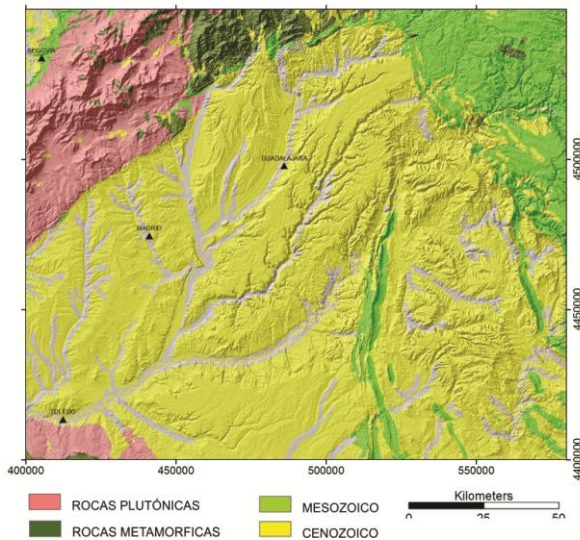


FIGURA 1: Marco geológico.

La cuenca de Madrid está rodeada por cabalgamientos, excepto en su límite SW, donde está conectada con la cuenca de La Mancha. El Sistema Central Español (SCE) representa el borde norte. Su levantamiento y exhumación ocurre simultáneamente a la subsidencia y relleno de las cuencas de Madrid y del Duero, como respuesta al acortamiento NW-SE desde la estructuración Pirenaica. El SCE es una estructura de doble vergencia en la que está implicado el basamento, que presenta una dirección NE-SW (De Vicente et al., 2007). En la falla del borde norte de la Cuenca de Madrid el salto estimado es de unos 2000 metros. El límite con los Montes de Toledo, viene definido por un cabalgamiento de piel gruesa con orientación N100 y vergencia norte, segmentado por rampas laterales (Vegas et al. 2004). La sierra de Altomira representa el límite SE de la cuenca. Es un cinturón de pliegues y cabalgamientos de piel fina con orientación N-S, que se explica como un escape tectónico asociado al final del acortamiento pirenaico durante el Oligoceno superior –Mioceno inferior (Muñoz-Martín et al. 1998). La Cadena Ibérica es una un cinturón de deformación resultante de la inversión tectónica de la cuenca Ibérica durante el Cenozoico. Su límite occidental, representado por un corredor de fallas de carácter transpresivo, constituye el borde NE de la Cuenca de Madrid (De Vicente *et al*, 2009). El basamento varisco que conforma la geometría de las cuencas es de carácter granítico en el sector occidental del SCE, mientras que en la zona oriental el basamento es principalmente metamórfico. Dentro de la zona metamórfica, se pueden distinguir dos tipos de basamento: ortogneis al oeste y rocas metamórficas de grado medio a bajo al este, separados por un accidente varisco N-S, la zona de cizalla de Berzosa (González-Casado, 1986). La cuenca de Madrid presenta un

registro sedimentario continuo, con pequeños hiatos desde el Cretácico Superior hasta el Mioceno Superior. Los sedimentos terciarios que rellenan la cuenca de Madrid muestran características de depósito continental, como lagos poco profundos, ríos o abanicos aluviales (Calvo, 2004). Se han detectado discordancias progresivas en los límites de la cuenca, lo que demuestra el carácter sintectónico del depósito, especialmente activo en este sentido es el tránsito Oligoceno-Mioceno Inferior (De Vicente y Muñoz-Martín).

GEOMETRÍA DE LA CUENCA DE MADRID

En este trabajo se han utilizado los resultados obtenidos por De Vicente y Muñoz-Martín (en revisión). Estos autores han recopilado y reinterpretado la información de 18 líneas sísmicas, junto con los informes de los 12 pozos ejecutados en el área y datos de campo (Querol, 1989). El mapa de espesor de sedimentos muestra un depocentro de más de 3000 metros, adosado a la falla del borde sur del Sistema Central Español. Hacia el sur el basamento aparece progresivamente más elevado, mostrando un alto del mismo en el sector central de la cuenca. En la parte oriental se observa un depocentro, asociado a la cuenca de Loranca. En el NE la geometría del basamento es más compleja, y se observan varios saltos en el mismo, asociados a distintos cabalgamientos orientados NE-SO a ENE-OSO. Estas estructuras aparecen segmentadas por desgarres NW-SE con movimiento lateral derecho, y que suponen auténticas zonas de transferencia limitando diferentes grados de acortamiento y/o vergencia en las estructuras (De Vicente y Muñoz Martín, en prensa).

ESTIMACIÓN DEL BASAMENTO MEDIANTE ANÁLISIS DE DATOS MAGNÉTICOS EN 3D

Los datos utilizados en este trabajo proceden del vuelo aeromagnético realizado durante los años 1986 y 1987, por el Instituto Geográfico Nacional (Ardizzone et al. 1989). Este vuelo estuvo compuesto por 102 líneas, con orientación N-S y un espaciado de 10 kilómetros y 20 líneas perpendiculares, separadas 40 kilómetros. La altitud del vuelo fue de 3000 metros sobre el nivel del mar. Estimaciones a la profundidad del basamento magnético. En este trabajo se han seguido cuatro aproximaciones distintas para el cálculo del basamento magnético a partir de mallas de datos. Estos métodos se han aplicado después de hacer la reducción al polo ya que esta reducción es necesaria para alguno de los métodos. Los resultados obtenidos serán comparados para analizar la coherencia y la consistencia de los mismos.

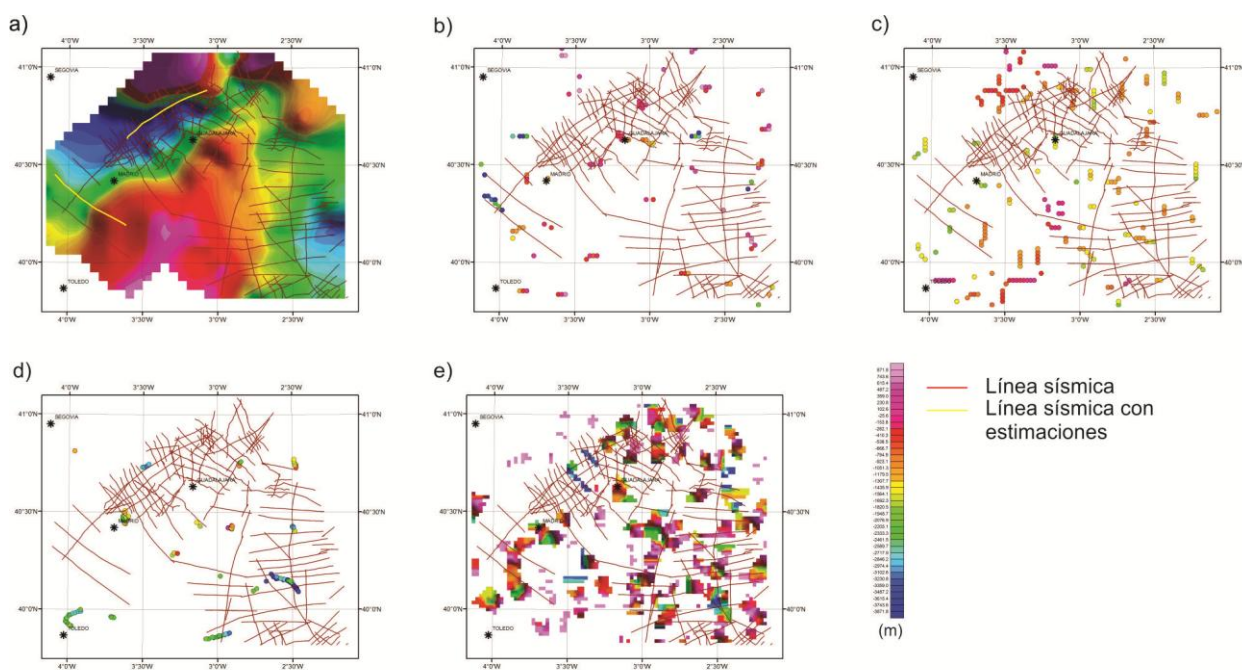


FIGURA 2. a) Mapa de la profundidad del basamento a partir de la interpretación sísmica. Mapas con estimaciones a la profundidad del basamento. b) Analytic Signal. c) SPI. d) Deconvolución de Euler. e) Tilt Depth

“Tilt Depth” (Salem et al., 2007). Es un método relativamente simple para calcular la profundidad del basamento magnético en fallas y en contactos magnéticos. Este método asume un contacto vertical 2D bajo un campo magnético vertical, por lo que se hace imprescindible la reducción al polo. Bajo estas condiciones, el “tilt derivative” es cero en el contacto. Este ángulo puede variar entre 45° y -45° y la profundidad del techo del contacto (z_0) es igual a la mitad de la separación (d) entre los contornos de 45° y -45° ($z_0 = d/2$).

“Source Parameter Imaging” (SPI, Thurston y Smith, 1997). Usa la segunda derivada del campo magnético total y el término conocido como “local wavenumber” para calcular las estimaciones al basamento magnético. Dicho término es máximo sobre los contactos aislados y la profundidad se estima sin asunciones sobre el espesor de la fuente.

“Deconvolución de Euler” (Reid et al., 1990). Este método combina las derivadas del campo magnético dentro de la ecuación de homogeneidad de Euler para identificar la localización, profundidad y naturaleza de la fuente magnética. Las distintas especificaciones de la ecuación, definidas mediante un índice estructural, (S.I.) permiten resolver la misma a partir de una ventana de datos. Esta ventana se mueve progresivamente, generando soluciones localizadas. El proceso se repite con varios tamaños de ventana e índices estructurales. Para determinar las soluciones óptimas, se analizan todas estadísticamente.

“Analytic Signal” (Salem y Ravat, 2003). Esta aproximación se desarrolla principalmente para estructuras bidimensionales. Para las mismas, la

profundidad puede obtenerse a partir de la anchura de las anomalías de la señal analítica o a partir de la relación entre la señal analítica y su derivada si se asume el tipo de fuente. La ventaja de este método es que no requiere datos de la dirección de magnetización y además es muy útil en casos de magnetización remanente o cuando los datos son adquiridos en latitudes bajas.

Los resultados obtenidos con estas metodologías se han comparado con la interpretación sísmica (figura 2). sobre fallas importantes. Algunas de las mismas se.

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS DIFERNTES TÉCNICAS DE INVERSIÓN

Las primeras estimaciones calculadas mediante “Analytic Signal” muestran buenos resultados en general, permitiendo diferenciar claramente el alto del basamento en el sector norte y el depocentro del NW. Por su parte, mediante “SPI” distinguimos bien los altos de basamento, añadiendo información a la zona sur, aunque las estimaciones resultan demasiado someras tanto para el depocentro de la cuenca de Madrid, como para la cuenca de Loranca. Las soluciones calculadas usando la Deconvolución de Euler, son escasas y no aportan información en los altos estructurales, sin embargo resultan claves para la interpretación de los depocentros, posiblemente asociado a grandes estructuras en el basamento. El método del “Tilt Depth” muestra una disposición más continua, que resulta de mucha ayuda a la hora de la interpretación. En la zona entre Madrid y Toledo,

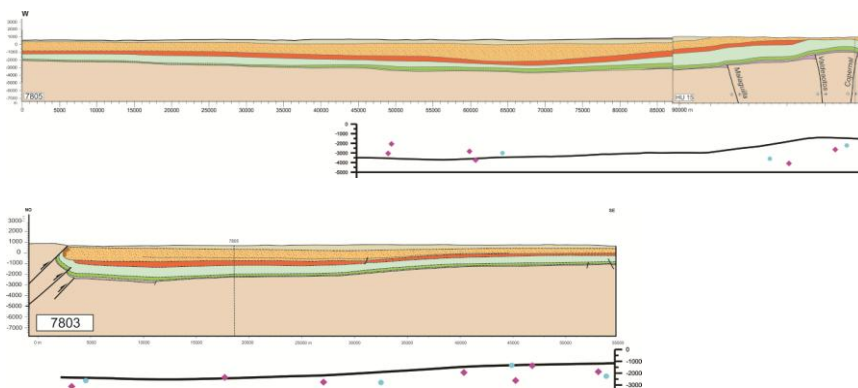


FIGURA3. Estimaciones a la profundidad del basamento a lo largo de las líneas sísmicas 7805+UH15 y 7803. En rojo estimaciones calculadas mediante Analytic signal y en azul Euler.

donde el cubrimiento sísmico es pobre, los resultados muestran una topografía mucho menos suave con altos y bajos del basamento. Los resultados son óptimos al norte de Madrid, donde se obtienen soluciones a lo largo de dos líneas sísmicas, coincidiendo plenamente. En el área al norte de Guadalajara, la tectónica es más compleja, y esto se refleja en el mapa de “Tilt Depth”, que no es tan suavizado como el procedente de la sísmica.

ESTIMACIÓN DEL BASAMENTO MEDIANTE ANÁLISIS DE DATOS MAGNÉTICOS EN 2D

Se han calculado estimaciones a la profundidad del basamento a lo largo de dos perfiles sísmicos (líneas 7805+HU-15 y 7803), que son independientes de las soluciones en planta (figura 3). Se han empleado los métodos de *Euler* y *Analytic Signal*. Los resultados son muy satisfactorios con la interpretación sísmica, mostrando alta coherencia con los datos estructurales. En la línea 7803 las estimaciones más someras ajustan con el basamento sísmicos. En ambos extremos de la línea se observan estimaciones más profundas que parecen relacionarse con estructuras cartografiadas, lo que lleva a pensar que las soluciones situadas en la parte central también están asociadas a fallas o a cambios litológicos. En la línea 7805+HU15 las estimaciones ajustan con mayor error en la parte occidental, mientras que en la oriental parecen relacionarse con los desgarres NW-SE identificados en la sísmica y mediante la cartografía de superficie.

CONCLUSIONES

Los métodos de estimación al basamento magnético resultan una herramienta de mucha utilidad en zonas en las que no existen datos sísmicos o donde la cobertura es pobre. En este sentido, el ahorro económico que supone esta técnica es muy grande, ya que permita la optimización de las campañas sísmicas. Los resultados obtenidos son muy satisfactorios, ya que las diferentes técnicas se complementan entre sí, dando unos resultados homogéneos.

La profundidad del basamento queda bien definida con estas metodologías, que además añaden información dentro del mismo. Como ya se había visto con la sísmica y los pozos, el mayor depocentro está asociado a la Falla del Borde Sur del Sistema Central, y existe otro depocentro, de menor profundidad en la cuenca de Loranca. En la cuenca de Madrid se distinguen

estructuras dentro del basamento, con un contraste lateral de susceptibilidad magnética.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Repsol Exploración S.A. las facilidades prestadas para el desarrollo de este trabajo. Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Proyecto de Investigación TopIberia (CSD2006-00041). Así mismo, nuestro agradecimiento a GETECH por las facilidades prestadas en el uso de su software.

REFERENCIAS

- Ardizzone, J.; Mezcuca, J. y Socias, I. (1989). Mapa aeromagnético de España peninsular. IGN
- Calvo, J.P (2004)) Libro de Geología de España (Ed. J.A. Vera)
- De Vicente et al. (2007). Cenozoic thick-skinned deformation and topography evolution of the Spanish Central System. *Global Planet. Change*, 58, 335–381,
- De Vicente et al. (2011) Tectonic classification of Cenozoic Iberian foreland basins. *Tectonophysics* 502, 38-61.
- De Vicente, G. y Muñoz-Martín, A (en revisión)
- González-Casado, J.M. (1986) Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- Muñoz-Martín et al. (1998) Finite-element modelling of Tertiary paleostress fields in the Eastern part of the Tajo Basin. *Tectonophysics* 300, 47-62.
- Querol, R. (1989) Geología del subsuelo de la Cuenca del Tajo. E.T.S.I Minas de Madrid, 48p
- Reid, A. et al. (1990). Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55, 80-91
- Salem, A. y Ravat, D. A (2003) Combined analytic signal and Euler method for automatic interpretation of magnetic data. *Geophysics*, 68, 1952-1961.
- Salem, A. et al. (2007). Tilt-depth method: a simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives. *The Leading Edge*, 1502-1505
- Thurston, J.B y Smith, R.S ((1997) Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI™ method. *Geophysics*, 61, 807-813.
- Vegas et al. (2004) Libro de Geología de España (Ed. J.A. Vera).